

ANÁLISIS Y PROYECCIÓN DEL MODELO DE AHORRO QUE REPRESENTA EL USO DE UN SISTEMA HÍBRIDO SOLAR- ELÉCTRICO PARA CALENTAMIENTO DE AGUA DOMICILIARIA

A. Lanson; A. Bianchi

GERSolar – INEDES – Universidad Nacional de Luján
Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (B6700CED) Luján, Buenos Aires, ARGENTINA
E-mail: gersolar@yahoo.com.ar

Recibido 08/08/16, aceptado 07/10/16

RESUMEN: Desde el año 2006 la Argentina importa gas para cubrir su déficit energético. Estudios publicados indican que el 30 % del consumo es residencial, donde el 35 % se destina a calentar agua. La energía solar térmica es una alternativa de sustitución y para cuantificar su ahorro esperable, se comparó el consumo eléctrico de un equipo híbrido solar con el de un equipo convencional, ambos bajo exigencias de una familia tipo. Se modeló el ahorro en función de la radiación solar diaria en el plano del colector y la temperatura media diaria y se ajustó logrando un coeficiente de determinación de 0,98 y un error típico de 7 %. Aplicado a datos históricos representó un promedio anual del 47 %. Con valores medio anuales mostró diferencias menores al 1%, lo que permitió su proyección a 15 localidades del país y la confección de un mapa de ahorro para la Argentina.

Palabras clave: energía solar térmica, modelización, calentamiento de agua sanitaria

INTRODUCCIÓN

Según los informes publicados por el Ministerio de Energía y Minería de la Nación la inyección a la red de Gas Natural importado, que comenzó en 2006, aumenta progresivamente. “Las implicancias económicas de disminuir las importaciones de gas son importantes, habida cuenta que el consumo de gas destinado al calentamiento de agua en Argentina equivale al 57% del gas importado.” (Gil S. y col., 2014). Gran cantidad de trabajos estudian la Energía Solar térmica en cuanto a su potencial para el calentamiento de agua sanitaria (Bianchi y col., 2015).

En el año 2010 fue publicado el informe “Barreras para el desarrollo del mercado de la energía solar para calentamiento de agua en América Latina y El Caribe” de la Organización Latinoamericana de Energía que exponía los resultados de un estudio de las principales causas por las cuales la energía solar térmica no está difundida en la región a pesar de representar una excelente alternativa de ahorro energético, de mejora de la calidad de vida y estar asociada con una correspondiente disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

Una de las barreras detectadas en este informe es la falta de políticas estatales de fomento de estas tecnologías. La elaboración de estas políticas necesita sustentarse sobre estudios que permitan predecir su impacto. Es por ello que este trabajo apunta a modelar y proyectar el funcionamiento de un sistema termosolar híbrido y el ahorro energético que puede esperarse de su aplicación en distintas zonas del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

En las instalaciones del grupo GERSolar, de la Universidad Nacional de Luján y con la colaboración del ENARGAS, la Universidad de San Martín y empresas privadas, existe un banco de ensayo que permite estudiar en forma simultánea varios equipos de calentamiento de agua sanitaria. Allí son medidos individualmente los consumos energéticos (de gas o electricidad) y, en el caso de los termostatos híbridos, su desempeño para aprovechar la energía solar (A. Lanson y col., 2012). De la operación de este banco durante tres años consecutivos se obtuvo una base de datos sólida y confiable, que permite relacionar el consumo energético diario [kWh] con distintas variables meteorológicas, como radiación solar [kWh]; temperatura ambiente [°C]; temperatura del recinto [°C] donde se ubican los termostatos; temperatura del agua en los distintos puntos del proceso [°C] y otras variables tales como el volumen de agua extraída [litro] y la energía extraída diariamente en agua caliente [kWh] (A. Lanson y col., 2014).

Para este trabajo se utilizó una base de datos diarios con registros de funcionamiento de un sistema híbrido solar-eléctrico compacto (Híbrido) con tanque de 290 litros y 3,46 m² de superficie colectora, y de un termostato eléctrico (Convencional) de 155 litros. El inicio de cada día fue considerado a las 18 hs del día anterior de manera tal que el día de registro abarque casi en su totalidad al día solar a los largo de todo el año, dentro de las posibilidades reales de control. Se dispuso de un total de datos correspondientes a 277 días, de los cuales se utilizaron 256 para ajustar los modelos y 21 datos para validarlos. El protocolo de ensayo utilizado es el descrito en la NAG-313/09 del ENARGAS donde se define que el consumo de agua caliente de una familia tipo promedia los 200 litros a 42 °C.

Con el fin de elaborar un mapa de ahorro energético termosolar para uso domiciliario, se ejecutó la siguiente secuencia de pasos.

a) El total de las variables disponibles fueron evaluadas en cuanto a su correlación lineal con el consumo eléctrico del sistema híbrido. En este análisis se detectó que la temperatura media del habitáculo (\bar{T}_{int}) guarda una correlación lineal con la temperatura media exterior (\bar{T}_e) con un coeficiente de determinación (R^2) superior a 0,98 y con un error cuadrático medio (RMSE) del 3 %, de manera que no aporta información relevante al modelo y fue descartado del análisis.

Se modeló el consumo eléctrico de los dos equipos. El consumo eléctrico del híbrido (CH), en función de la radiación solar diaria en plano inclinado (Rad) donde la radiación fue convertida a un plano inclinado con el mismo ángulo del colector que presenta el termostato Híbrido usando el modelo de Lui y Jordan (Lui y Jordan, 1961); la radiación solar del día anterior (Rad₁) y la temperatura media diaria (\bar{T}_e). El consumo eléctrico del convencional (CC), en función de la temperatura media diaria. Luego se evaluó el ahorro como la diferencia entre ambos consumos y se lo comparó con un modelo de ahorro energético obtenido directamente de la base de datos (Modelo de Ahorro Directo) (A. Lanson y col., 2015).

b) Se validó los tres modelos con los 21 datos reservados para este fin. En todos los casos tanto el ajuste como la validación fueron comparados en función del coeficiente de determinación (R^2); el sesgo (MBE) y el error cuadrático medio (RMSE). Con los resultados de aplicar el modelo al período 2014-2015 se comparó el ahorro total modelado con el ahorro total medido. Dado que la base de datos tiene días del año faltantes, para completar un año completo se determinaron los ahorros diarios medios mensuales de cada uno y se ponderó por el número de días de cada mes. Luego se contrastó el valor total anual de ahorro en ambos casos.

c) Evaluación de la necesidad de disminuir el error típico del modelo de ahorro a través de la corrección de la base de datos del ensayo. En el análisis de la variación de la temperatura de mezcla de agua media diaria (Tmd) para cada sistema del ensayo, se encontró que la Energía Extraída de Convencional (EEC) superó en todos los casos la Energía a Extraerse según el protocolo (EEref). En el caso del Híbrido, la Energía Extraída (EEH) mayormente no alcanzó ese valor. Se analizó el consumo de ambos sistemas en función de la energía diaria extraída (CC vs. EEC y CH vs. EEH) y se observó que en ambos casos esta relación es lineal. Sobre esta observación se comparó la corrección de los consumos de ambos sistemas con dos métodos. Uno directo con la relación entre EEref y EEC medida, y EEref y EEH medida. El otro con modelos de consumo que contemplan todas las variables utilizadas en los modelos anteriores, es decir que el CC se corrigió con un modelo que contempla la temperatura

exterior (\bar{T}_e) y la EEC, mientras la corrección de CH incluye también la radiación solar en plano inclinado (Rad) y la radiación solar en plano inclinado del día anterior (Rad₋₁).

Se corrigieron en forma lineal los consumos eléctricos diarios de ambos equipos con el objetivo de compensar la desviación de T_{md} de cada uno con respecto a los 42 °C que establece el protocolo (NAG-313/09). Con la base de datos ajustada se repitieron todos los pasos anteriores para obtener los modelos de consumo ajustado (MCCb y MCHb) y ahorro ajustado (MADb).

d) Se aplicaron los modelos ajustados a la base de datos 2014-2015 y a la base 2006-2013, y se determinó el ahorro total anual medio en ambos casos. Estos valores se compararon con los datos medidos y con los resultados de los modelos anteriores.

e) Se realizó un análisis de sensibilidad de los modelos de ahorro respecto de sus variables asociadas.

f) Posteriormente se evaluaron las diferencias de aplicar los modelos a valores diarios, a valores diarios medios mensuales y valores diarios medios anuales de radiación solar y temperatura.

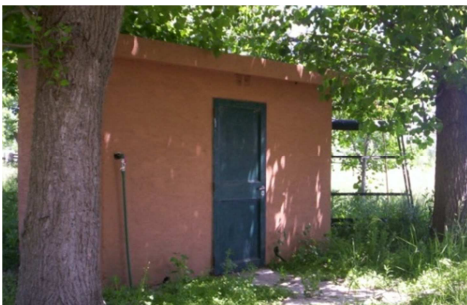
g) Finalmente se aplicaron los modelos a datos medios anuales de radiación y temperatura de 15 localidades más, lo que permitió elaborar una tabla de datos de ahorro georreferenciados para volcarlos en un mapa. Las localidades fueron elegidas en función de la cantidad de datos históricos que conformaron las medias para el período 1980-2010 de manera de garantizar la convergencia de ambas series de tiempo (H. Grossi y col., 2013).

RESULTADOS

La secuencia anterior tiene asociados los siguientes resultados.

a) La temperatura media diaria del recinto de ensayo donde funciona el termotanque convencional depende de la temperatura media diaria exterior. La dependencia está dada por la siguiente expresión:

$$\bar{T}_{int} = 4,335 + 0,858 \bar{T}_e \quad (1)$$



Donde \bar{T}_{int} es la temperatura media diaria del recinto y \bar{T}_e es la temperatura media diaria exterior

Esta característica es particular de este ensayo.

En este caso se trata de un recinto de material, con paredes de ladrillo hueco revocado y techo de losa de hormigón.

Figura 1: Imagen del recinto de ensayo

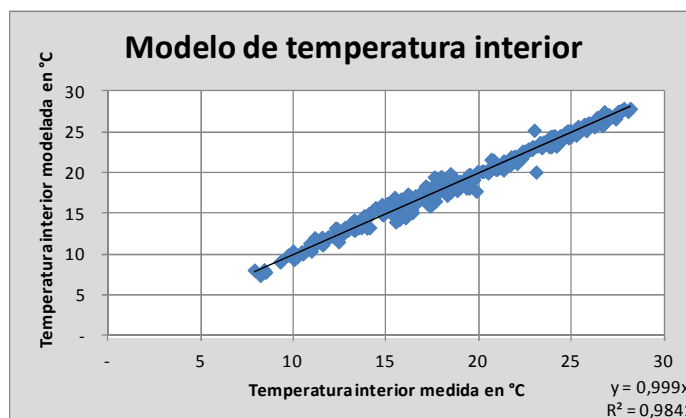


Figura 2: Gráfica que representa el modelo de temperatura media diaria del recinto en función de la temperatura media diaria del recinto real medida en °C. Este modelo tiene un sesgo del 0% y un error cuadrático medio de 3%

b) Los modelos de consumo eléctrico del sistema híbrido y del convencional que mejor se ajustaron a la base de datos son los presentados en las siguientes ecuaciones:

$$MCC = 9,858 - 0,146 \bar{T}_e \quad (2)$$

$$MCH = 12,580 - 0,425 Rad - 0,793 Rad_{-1} - 0,167 \bar{T}_e \quad (3)$$

Donde MCC es el modelo de Consumo Convencional en kWh/día, con un ajuste de R^2 de 0,92 y un error típico de 4%, MCH es el modelo de Consumo Híbrido en kWh/día con un ajuste de R^2 de 0,92 y un error típico de 24%. \bar{T}_e es la temperatura media diaria; Rad es la radiación solar diaria en plano inclinado a 42° y Rad₋₁ en la radiación solar en plano inclinado a 42° del día anterior.

$$MAD = -2,601 + 0,424 Rad + 0,759 Rad_{-1} + 0,024 \bar{T}_e \quad (4)$$

Finalmente MAD es el modelo de Ahorro Directo en kWh/día, con un ajuste de R^2 de 0,88 y un error típico de 18% en función de las mismas variables que los modelos de consumo.

c) La validación de los modelos MCC, MCH y MAD con los datos medidos que fueron separados de la base de datos para este fin arrojó los valores que se presentan en la tabla 1

Validación	R^2	Sesgo	RMSE
MCC	0,774	5%	7%
MCH	0,960	30%	41%
MAD	0,955	-11%	22%

Tabla 1: Resultados de la validación de los modelos de consumo y de ahorro realizados sobre 21 datos medidos que no formaron parte de la base de datos de ajuste. La evaluación de su poder predictivo se realizó mediante la determinación del coeficiente de determinación (R^2); el sesgo y el error cuadrático medio (RMSE)

Luego se aplicaron estos modelos a la misma base de datos 2014-2015 del ensayo, se calcularon los consumos convencionales diarios medios de cada mes del año modelado y medido, se ponderaron por el total de días de cada mes y se calculó el ahorro y consumo convencional anual. Estos valores en kWh/día y kWh/año se muestran en la tabla 2.

2014-2015	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
CCM	6,4	6,3	6,5	6,8	8,2	8,6	8,3	7,6	7,7	7,2	6,9	6,6	2.652
MCC	6,5	6,3	6,7	7,0	8,1	8,4	8,3	7,7	7,7	7,1	6,9	6,6	2.666
AM	4,5	5,0	4,9	5,3	3,2	3,3	2,7	4,2	3,7	3,6	4,4	4,7	1.498
MAD	4,7	4,7	4,4	4,6	2,9	3,1	2,8	4,4	3,6	3,5	4,5	5,2	1.471

Tabla 2: Datos Diarios Medios mensuales y total ponderado anual del Consumo Convencional Medido (CCM); del Modelo de Consumo Convencional (MCC); del Ahorro Medido (AM) y del Modelo de Ahorro (MAD). La columna Anual presenta la suma ponderada de los valores diarios medio mensuales de cada mes en Kwh

En la tabla 2 se observa que el valor total anual del Consumo Convencional Modelado difiere del Medido en un 0,5%, mientras que el Ahorro modelo difiere del Modelado en un -1,8%.

d) Si bien un análisis publicado en un trabajo anterior no detectó diferencias estadísticamente significativas entre las medias y las varianzas de EEC; EEH y EEref, se repitió la evaluación del impacto de las desviaciones en la Energía Extraída de cada sistema sobre el cálculo de ahorro energético (A. Lanson y col., 2015). El protocolo utilizado establece un requerimiento distribuido a lo largo del día. Durante el ensayo, esta temperatura es regulada mecánicamente por una válvula termostática. Esta válvula además de requerir un tiempo de adaptación a la temperatura del agua, tanto del ingreso caliente como del ingreso frío, tiene un tope de regulación del paso para ambas vías. El efecto de esta limitación se ve reflejado en una regulación gradual de la temperatura del agua de salida

a lo largo de cada extracción. En este caso se evaluó la temperatura media diaria del agua a la salida de la válvula (Tmd).

En el caso del ingreso de agua fría, en las distintas estaciones del año, se observó una fluctuación en la temperatura que abarcó desde 12 °C hasta 27,5 °C.

En el sistema Convencional, se detectó que la temperatura del agua a la salida del termotanque varió entre 47 °C y 59 °C, que dada la cercanía al punto de mezcla, puede considerarse aproximadamente igual a la temperatura a la que ingresó a la válvula de mezcla durante sus extracciones. En este caso el agua estancada en la cañería es inferior a 0,6 litros.

En el caso del sistema Híbrido, el agua caliente a la salida del tanque se registró entre 49 °C y 83 °C; luego, antes de ingresar a la cañería que la lleva hasta la válvula mezcladora, es regulada con agua fría a 55 °C por otra válvula termostática propia del equipo. Este trayecto tiene una longitud poco mayor a 12 metros, y contiene aproximadamente 4 litros de agua estancada. Esta característica hace que el agua que llega a la válvula mezcladora, al iniciarse cada ciclo de extracción, se encuentra afectada por la temperatura exterior, en mayor o menor medida en función del tiempo transcurrido entre extracciones. Las temperaturas de mezcla de las extracciones de las 7 hs y las 20 hs fueron las que mostraron mayores dificultades en alcanzar la temperatura deseada.

El análisis de la temperatura de mezcla diaria mostró una relación lineal con la temperatura exterior media diaria. La figura 2 presenta esta relación para cada uno de los sistemas y la temperatura de referencia exigida por el protocolo de ensayo.

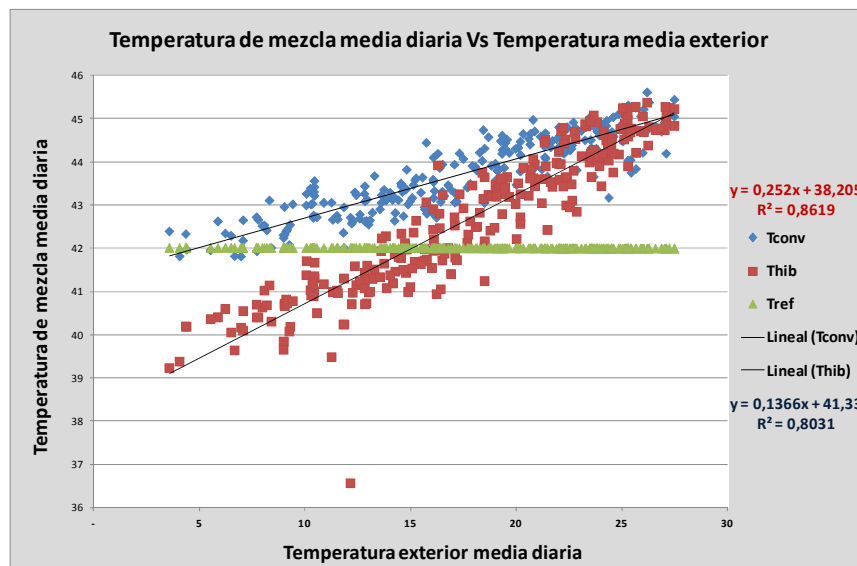


Figura 3: Relación entre la temperatura media diaria del agua caliente, luego de ser regulada por la válvula termostática, extraída de cada sistema en función de la temperatura media diaria exterior. En verde, la temperatura de referencia de 42°C

A pesar de esta relación lineal, los modelos lineales para corregir el CC y CH en función de la Tmd presentaron serias dificultades, coeficientes de determinación bajos (menores a 0,6), altos errores cuadráticos (mayor 45%) y una caída del ahorro porcentual mayor al 11%.

Se corrieron regresiones lineales de manera de corregir los consumos con la relación entre la Energía diaria Extraída (EEC y EEH) y la Energía diaria a Extraer (Eeref) definida por el protocolo.

Luego se corrigieron los consumos Convencional e Híbrido modelando su relación con todas las variables anteriores en cada caso y la Energía Diaria Extraída. Esto quiere decir que el Consumo Convencional se definió linealmente con la temperatura exterior y la EEC, y el Consumo Híbrido en función de la temperatura exterior, la radiación solar, la radiación solar del día anterior y la EEH.

Estos modelos se ajustaron a la base de datos con los resultados expresados en la tabla 3

	Ajuste			Validación		
	R ²	Sesgo	Error	R ²	Sesgo	Error
CCb	0,942	0,0%	6,3%	0,645	5,0%	2,7%
CHb	0,914	0,0%	12,7%	0,874	11,7%	3,6%

Tabla 3: Coeficiente de determinación (R²); sesgo y Error cuadrático medio del ajuste y la validación de los modelos de consumos corregidos (CCb y CHb) con regresión lineal a todas las variables de funcionamiento incluida la energía extraída diariamente en agua caliente

Una vez obtenidas estas ecuaciones, se determinaron los consumos con la EEref. Así se obtuvieron los consumos corregidos Convencional e Híbrido que permitieron estimar el ahorro energético como la diferencia entre ellos.

Con el Consumo Convencional corregido (CCb) y el ahorro corregido (Ahorro b), se ajustaron los modelos MCCb y MADb. Este último se presenta en la ecuación 5

$$MADb \left[\frac{kWh}{dia} \right] = -2,982 + 0,399 Rad + 0,789 Rad_{-1} + 0,027 \bar{T}_e \quad (5)$$

La ecuación 5 es válida sólo para el equipo híbrido compacto testado, en relación al termotanque eléctrico elegido y bajo las condiciones de uso definidas por el protocolo.

El ajuste del modelo de ahorro en base a consumos corregidos con regresión lineal presentó un coeficiente de determinación (R²) de 0,984, un sesgo de 0% y un error cuadrático medio (RMSE) de 7 %. Su validación, un R² de 1, sesgo de 1,9% y RMSE de 3,5%. Estos valores demuestran que este ajuste permite tener un error típico sensiblemente menor. Por lo que se optó por continuar el análisis con este segundo par de modelos (MCCb y MADb).

Se calcularon los valores medios mensuales y el ponderado anual del consumo y el ahorro medidos y de la proyección del modelo de Consumo Convencional corregido (MCCb) y el Modelo de Ahorro corregido MADb sobre la misma base de datos. La tabla 4 muestra estos resultados en kWh/día y el total de kWh anual.

2014-2015	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
CCM	6,4	6,3	6,5	6,8	8,2	8,6	8,3	7,6	7,7	7,2	6,9	6,6	2.652
MCCb	6,0	5,8	6,3	6,6	8,0	8,3	8,2	7,5	7,4	6,7	6,5	6,1	2.531
AM	4,5	5,0	4,9	5,3	3,2	3,3	2,7	4,2	3,7	3,6	4,4	4,7	1.498
MADb	4,4	4,4	4,1	4,3	2,7	2,7	2,4	4,1	3,3	3,2	4,2	4,9	1.362

Tabla 4: Medias mensuales y total ponderado anual de Consumo Convencional medido (CCM) y del Modelo de Consumo Convencional corregido (MCCb). En la columna Anual se presenta la suma ponderada de los valores mensuales por el número de días de cada mes. Medias mensuales y su total anual ponderado del ahorro medido (AM) y del modelo de ahorro corregido (MADb).

La diferencia entre el consumo convencional total anual medido y el modelado es de 4,6%, mientras que la diferencia entre totales anuales de ahorro medido y modelado es de 9,1%.

e) A continuación se analizó la diferencia entre aplicar los primeros modelos (MCC y MAD) y los modelos ajustados con los consumos corregidos (MCCb y MADb). Para esto se aplicaron ambos pares de modelos a la base histórica de Luján (2006-2013). La tabla 5 muestra los resultados en kWh/año.

2014-2015	Medido	Modelo	Corregido	Modelo corregido	Diferencia
Cons.Conv	2.652	2.666	2.531	2.528	0,1%
Ahorro	1.498	1.471	1.364	1.358	0,5%
Ahorro %	56%	55%	54%	54%	0,2%

2006-2013	Medido	Modelo	Corregido	Modelo corregido	Diferencia
Cons.Conv	2.652	2.704	2.531	2.574	-1,7%
Ahorro	1.498	1.360	1.364	1.247	8,6%
Ahorro %	56%	50%	54%	48%	5,5%

Tabla.5: Total anual calculado con los valores diarios medios mensuales y ponderados por los días de cada mes, de Consumo Convencional Medido (CCM), el Ahorro Medido (AM), el modelo de Consumo Convencional sin ninguna corrección (MCC), el Consumo Convencional corregido (CCb), el ahorro corregido (AMb), el Modelo de Consumo Convencional Corregido (MCCb) y el Modelo de Ahorro corregido (MADb). En la columna Diferencia se muestra la diferencia entre los modelos de datos medidos y datos corregidos. En la fila Ahorro % se presenta la proporción de consumo convencional ahorrado según cada modelo.

En la tabla 5 podemos ver que la diferencia entre aplicar los modelos ajustados con los datos medidos y los modelos ajustados con los consumos corregidos es superior al 8 % en el caso del ahorro en kWh/año, y no supera el 6 % en el caso del ahorro relativo al Consumo Convencional.

f) Un análisis de sensibilidad de los modelos permitió ponderar la variación del ahorro en función de la variación de la radiación solar en plano inclinado a 42° y la variación de la temperatura. Se ejecutó con un gradiente de 0,5 kWh/m²/día para la primera variable desde 3,6 hasta 6,6 kWh/m²/día, y de 2,5 °C para la segunda desde 9,2 hasta 24,2°C. De esta manera los valores medios anuales de Luján están representados en el centro de cada escala. En la Figura 3 se observan las tablas con los valores para cada combinación.

MAD		Rad							Temp		MCC	
3,86	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6		9,2	7,42		
9,2	3,03	3,24	3,46	3,67	3,88	4,09	4,30	-3%	11,7	8,51	10%	
11,7	3,09	3,31	3,52	3,73	3,94	4,15	4,36	-2%	14,2	7,78	5%	
14,2	3,15	3,37	3,58	3,79	4,00	4,21	4,43	0%	16,7	7,41	0%	
16,7	3,22	3,43	3,64	3,85	4,06	4,28	4,49	1%	19,2	7,05	-5%	
19,2	3,28	3,49	3,70	3,91	4,12	4,34	4,55	3%	21,7	6,68	-10%	
21,7	3,34	3,55	3,76	3,97	4,19	4,40	4,61		24,2	6,31		
24,2	3,40	3,61	3,82	4,04	4,25	4,46	4,67					
	-11%	-6%			6%	11%						

MADb		Rad							Temp		MCCb	
3,55	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6		9,2	7,06		
9,2	2,74	2,94	3,14	3,34	3,54	3,74	3,94	-4%	11,7	7,94	12%	
11,7	2,81	3,01	3,21	3,41	3,60	3,80	4,00	-2%	14,2	7,50	6%	
14,2	2,87	3,07	3,27	3,47	3,67	3,87	4,07	0%	16,7	7,06	0%	
16,7	2,94	3,14	3,34	3,54	3,74	3,94	4,14	2%	19,2	6,62	-6%	
19,2	3,01	3,21	3,41	3,61	3,81	4,01	4,21	4%	21,7	6,18	-13%	
21,7	3,08	3,28	3,48	3,68	3,88	4,08	4,28		24,2	5,74		
24,2	3,15	3,35	3,55	3,75	3,95	4,14	4,34					
	-11%	-6%			6%	11%						

Figura 4: Análisis de sensibilidad de los 4 modelos. En los laterales verticales de los recuadros se puede ver la variación de cada modelo relativa al valor medio anual para Luján con la variación de la temperatura (°C). En los laterales horizontales inferiores, la variación de cada modelo relativa al valor medio anual para Luján con la variación de la radiación solar (kWh/m²).

En la figura 4 puede verse que ante un aumento de la radiación media anual de 0,5 kWh/m², que representa el 10 % en el caso de Luján, ambos modelos de ahorro aumentan un 6 %. A su vez ante un aumento de 2,5 °C, que representa el 15 % de la temperatura diaria media anual de Lujan, el modelo de ahorro MADb aumenta un 2 % y el modelo de consumo MCCb disminuye un 6 %. Por lo tanto cuando se den ambas condiciones, la relación entre el ahorro y el consumo, el ahorro porcentual, sólo aumentará un 2 %.

g) Los datos diarios medios mensuales y los totales medios anuales, tanto de radiación solar como de temperatura suelen estar disponibles en mayor cantidad de puntos del país. A su vez, su manipulación es más sencilla que en el caso de los datos diarios. A continuación se evaluó la variación de los totales anuales de los modelos tanto con datos mensuales como con datos anuales, y se comparó con su aplicación a datos diarios.

La tabla 6 presenta las diferencias de los resultados de aplicar cada modelo a datos medios mensuales y anuales, en referencia a los resultados anteriores.

Base 2006-2013	MCC	Dif.	MAD	Dif.%	MCCb	Dif.	MADb	Dif.%
Dato diario	2.704		1.360		2.574		1.247	
Dato mensual	2.704	0,0%	1.360	0,0%	2.574	0,0%	1.247	0,0%
Dato Anual	2.704	0,0%	1.373	0,9%	2.574	0,0%	1.260	1,0%

Tabla 6: Resultados de los modelos aplicados a datos diarios, datos medios mensuales y datos medios anuales de Luján. Los porcentajes representan la proporción de la diferencia entre los totales medios anuales obtenidos al aplicar los distintos modelos a datos diarios, medios mensuales o medios anuales. La base de datos contiene los registros de los años 2006 a 2013

Los resultados obtenidos con datos mensuales y anuales representan una diferencia con respecto a los resultados obtenidos con datos diarios, menor al 1 %. Considerando que el modelo tiene un error cuadrático medio del 18 % y 7 %, esta diferencia es considerada despreciable.

La radiación solar en plano inclinado del día anterior (Rad_{i-1}) carece de sentido en el caso de aplicar los modelos a datos diarios medios mensuales o a datos diarios medios anuales. Esto hace que los modelos de ahorro se simplifiquen a las siguientes ecuaciones:

$$MAD = -2,601 + 1,183 Rad + 0,024 \bar{T}_e \quad (6)$$

$$MADb = -2,982 + 1,188 Rad + 0,027 \bar{T}_e \quad (7)$$

A pesar de la leve diferencia entre aplicar el modelo a datos diarios medios mensuales y medios anuales, los datos medios mensuales permiten evaluar ahorros estacionales y brindan mayor información al momento de evaluar modificaciones al ensayo.

h) Por último se aplicó este último modelo (MADb) a los datos medios anuales de 15 localidades diferentes, sobre bases de datos de radiación solar en plano inclinado y temperatura media diaria anual.

La Figura 5 presenta rápidamente los resultados obtenidos.

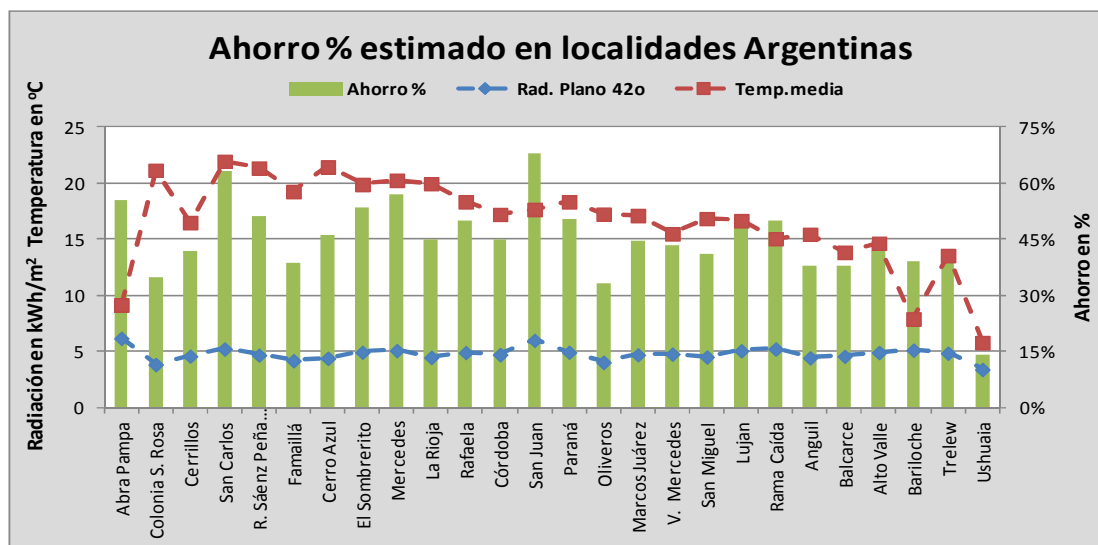


Figura 5: Radiación Solar en plano inclinado y temperatura ambiente medias anuales de 15 localidades argentinas y la aplicación de los modelos MADb/MCCb.

ESTACION de medición	Lat	Long	Datos medios diarios anuales		MADb	MCCb	Ahorro %	Ahorro/año
			Rad. Plano 42°	Temp.media	kWh/día	kWh/día	MADb/MCCb	kWh/año
Abra Pampa	-22,85	65,85	6,21	9,19	4,65	8,4	55%	1.696
Colonia S. Rosa	-23,37	64,50	3,87	21,21	2,19	6,3	35%	800
Cerrillos	-24,90	65,48	4,62	16,54	2,96	7,1	42%	1.080
San Carlos	-25,88	65,88	5,26	22,00	3,87	6,1	63%	1.413
R. Sáenz Peña Peña	-26,87	60,45	4,71	21,40	3,20	6,2	51%	1.167
Famailá	-27,05	65,42	4,21	19,30	2,55	6,6	39%	931
Cerro Azul	-27,65	55,43	4,43	21,50	2,87	6,2	46%	1.046
El Sombrerito	-27,65	58,77	4,97	19,94	3,47	6,5	53%	1.265
Mercedes	-29,17	58,02	5,12	20,30	3,66	6,4	57%	1.335
La Rioja	-29,42	66,85	4,50	20,00	2,91	6,5	45%	1.063
Rafaela	-31,28	61,55	4,94	18,40	3,39	6,8	50%	1.236
Córdoba	-31,43	64,18	4,76	17,26	3,14	7,0	45%	1.146
San Juan	-31,62	68,53	6,03	17,70	4,67	6,9	68%	1.703
Paraná	-31,83	60,52	4,96	18,40	3,42	6,8	51%	1.247
Oliveros	-32,55	60,85	4,07	17,29	2,32	7,0	33%	848
Marcos Juárez	-32,68	62,12	4,73	17,17	3,11	7,0	45%	1.135
V. Mercedes	-33,72	65,48	4,81	15,53	3,16	7,3	43%	1.152
San Miguel	-34,55	58,73	4,55	16,89	2,88	7,0	41%	1.053
Lujan	-34,59	61,55	5,10	16,70	3,53	7,1	50%	1.289
Rama Caída	-34,67	68,38	5,26	15,10	3,68	7,3	50%	1.342
Anguil	-36,50	63,98	4,47	15,50	2,75	7,3	38%	1.004
Balcarce	-37,75	58,30	4,61	13,88	2,87	7,6	38%	1.049
Alto Valle	-39,02	67,67	4,94	14,70	3,29	7,4	44%	1.200
Bariloche	-41,15	71,17	5,15	7,94	3,36	8,6	39%	1.226
Trelew	-43,23	65,30	4,89	13,60	3,19	7,6	42%	1.166
Ushuaia	-54,80	67,75	3,43	5,82	1,25	9,0	14%	456

Tabla 7: Resultados de aplicar los modelos MADb y MCCb a los datos medios anuales de radiación solar y temperatura, de 26 localidades de distintas regiones del país

El equipo Híbrido utilizado tiene una resistencia eléctrica en el tanque ubicado horizontalmente a mitad de su altura. Esta es una falencia en su construcción dado que al mantener el volumen de agua caliente, disminuye el poder de transferencia térmica del colector solar. Con una configuración más adecuada, los ahorros podrían ser superiores a los observados.

A través de las coordenadas de cada localidad y con los datos expuestos en la tabla 7, se alimentó el programa Surfer 10 de manera de poder obtener un mapa de isolíneas de ahorro relativo. A continuación la Figura 4 muestra el mapa de la República Argentina con 2 capas superpuestas: una indica la localización de los puntos donde se estimó MADb/MCCb, y la otra presenta el mapa de contorno de los resultados entre ellos.

La Figura 6 muestra sobre el mapa de contorno, las localidades donde fueron calculados los ahorros.

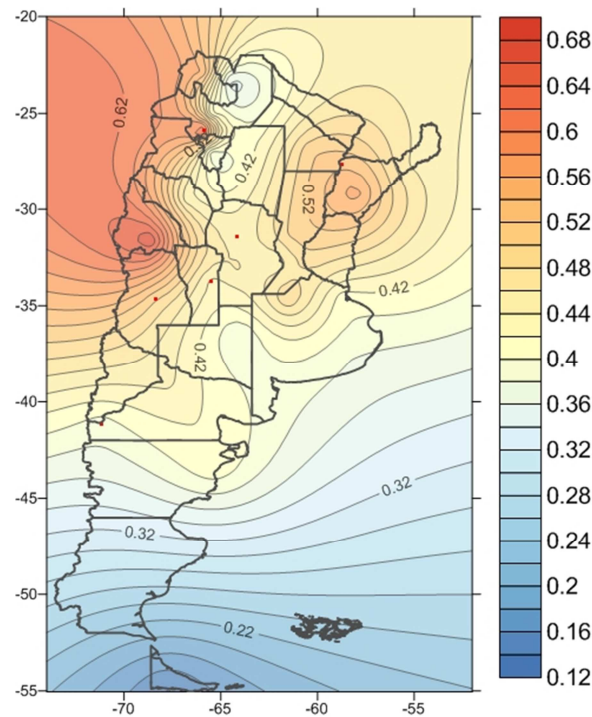


Figura 6: Mapa de la Argentina con isolíneas del ahorro porcentual esperado aplicando los modelos MADb /MCCb.

CONCLUSIÓN

Durante este trabajo se han verificado algunos supuestos y se han obtenido algunas conclusiones.

- ✓ Se verificó que la radiación solar incidente y la temperatura ambiente bastan como variables para modelar el ahorro energético del termotanque híbrido estudiado y que bastó una correlación lineal para modelar el ahorro energético del sistema.
- ✓ En el caso de los termotanques convencionales, se verificó que la temperatura del habitáculo no aporta mayor información que la temperatura exterior cuando se trabaja sobre datos diarios.
- ✓ Una regresión lineal con suficientes datos diarios de radiación solar en el plano del colector; radiación solar del día anterior en el mismo plano y temperatura ambiente, permite modelar el funcionamiento de un sistema termosolar con suficiente precisión.
- ✓ Si bien no se verificó si el año de ensayo correspondió a un año meteorológico típico, las proyecciones de estos modelos a series temporales de estas mismas variables en base diaria presentaron variaciones menores al 8 % con respecto a los valores medidos.
- ✓ Todos los ajustes que permitieron al ensayo mejorar su cumplimiento con las especificaciones del protocolo elegido disminuyeron el error típico de los modelos resultantes. Esta mejora es necesaria para poder evaluar el ahorro en la franja centro y noreste del país con mayor precisión.
- ✓ Para un consumo de 200 litros/día de agua a 42 °C estos equipos pueden representar un ahorro de energía entre 990 y 1380 kWh/año por grupo familiar, según la zona del centro o norte país donde esté instalado. En valores relativos el ahorro fluctúa entre un 42% y un 59% del consumo convencional.
- ✓ El modelo de ahorro energético obtenido es sensible a las variables analizadas.
- ✓ La aplicación de los modelos obtenidos a datos medios mensuales no presentó diferencias con respecto a su aplicación a datos diarios. Tampoco se observaron diferencias significativas al aplicarlos a datos medios anuales, esto facilita su proyección a mayor cantidad de puntos del país.
- ✓ Según el mapa de ahorro relativo de la Figura 6, a excepción de la Patagonia y San Juan, puede esperarse un ahorro relativo entre el 40 % y el 60 % de la aplicación de esta tecnología.
- ✓ El equipo Híbrido utilizado tiene una resistencia eléctrica en el tanque ubicado horizontalmente a mitad de su altura. Esta es una falencia en su construcción dado que al mantener el volumen de agua caliente, disminuye el poder de transferencia térmica del colector solar. Con una configuración más adecuada, los ahorros podrían ser superiores a los observados.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Salvador Gil por su participación en este proyecto, a ENARGAS y la UNSAM, quienes han contribuido al financiamiento del mismo. Al SMN por los datos históricos compartidos que permitieron la proyección de modelos. De igual forma, la participación generosa de las firmas Orbis y Rheem, quienes facilitaron el equipamiento, al Ing. Eduardo Benitez Sigaut y al Sr. Adrian Roldan quienes pusieron tiempo y esfuerzo en construir el tablero de ensayo y su puesta en marcha. A la Universidad Nacional de Luján, por facilitar todas las instalaciones necesarias. Y al Dr. Raúl Righini por su permanente colaboración en mejorar nuestra formación profesional y personal.

ABREVIACIONES

CH: Consumo eléctrico del Sistema Híbrido
CC: Consumo eléctrico del termotanque Convencional
CCM: Consumo Convencional Medido (termotanque convencional),
CCb: Consumo Convencional Medido corregido
AM: Ahorro Medido (diferencia entre consumos)
AMb: Ahorro Medido corregido
Rad: Radiación solar diaria en el plano del colector
Rad₁: Radiación solar del día anterior en el plano del colector
 \bar{T}_e : Temperatura media diaria exterior
 \bar{T}_{int} : Temperatura media diaria del recinto
Tmd: Temperatura media diaria del agua de mezcla
EEC: Energía Extraída del Convencional (termotanque convencional)
EEref: Energía a Extraerse según el protocolo (de referencia).
EEH: Energía Extraída del Híbrido (sistema híbrido solar)
R²: Coeficiente de determinación
MBE: sesgo o suma de las diferencias entre el valor estimado y el valor medido
RMSE: Error cuadrático medio
MCC: Modelo de Consumo del termotanque Convencional
MCH: Modelo de Consumo del sistema Híbrido
MCCb: Modelo de consumo del termotanque Convencional ajustado
MAD: Modelo de ahorro directo por diferencia entre los consumos eléctricos
MADb: Modelo de ahorro ajustado
SMN: Servicio Meteorológico Nacional

BIBLIOGRAFÍA

- Bianchi A., Lanson A. (2015). Modelado del consumo energético en termotanques solares híbridos y convencionales bajo exigencias normales de uso. Actas del Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas 2015 pp. 1058-1067
- Gil S., Prieto R., Iannelli L. (2014). Barreras para el Desarrollo de la Energía Solar Térmica en Argentina - Amortización de los equipos solares híbridos. - 5° Congreso Internacional Solar Cities “ENERGIA EN LAS CIUDADES: INNOVACION FRENTE AL CAMBIO CLIMATICO “
- Grossi Gallegos H., Croquet E., Spreafichi M.I. (2013). Acerca de la longitud de las series temporales de irradiación solar global con vistas a su aprovechamiento energético. Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 1, pp. 11.85-11.92

Lanson A., Benítez E., Roldán A., Righini R. (2012). Banco de ensayo de ahorro energético de termotanques híbridos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 16, pp. 08.65-08.70 - ISSN 0329-5184

Lanson A., Bianchi A. (2015). Estimación del ahorro energético que podría obtenerse del uso de sistemas termosolares híbridos en distintos puntos del país. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3, pp. 08.249-08.259

Liu, B.Y.H. and Jordan, R. (1961) Daily insolation on surfaces tilted toward the equator. ASHRAE Journal, October 1961, pp. 53-59.

OLADE (2010). Barreras para el desarrollo del mercado de la energía solar para calentamiento de agua en América Latina y el Caribe. http://biblioteca.olade.org/iah/fulltext/Bjmb/v32_2/old0221.pdf

ENARGAS: www.energas.gov.ar, normas técnicas, 2016, NAG 313/09

ABSTRACT

Since 2006 gas importation has been needed to supply Argentina's energy demand. Recent studies indicate that 30% of consumption is residential, where 35% goes to heating water. Solar thermal energy is an alternative replacement and to quantify the expected savings, power consumptions were compared between an hybrid solar equipment and a conventional system, both under a type family demands. The saving was modeled as a function of daily solar radiation in the collector plane and the average daily temperature, and was adjusted making a determination coefficient of 0.98 and standard error of 7%. Applied to historical data it determined an annual average of 47%. With average annual values showed differences smaller than 1%, which allowed its projection to 15 locations across the country and making a map of savings for Argentina